Transport and Communications Science Journal, Vol 74, Issue 09 (12/2023), 1075-1087

Transport and Communications Science Journal

CREATING A COUPLED TRAIN-RAIL DYNAMIC MODEL BASED ON THE EXPERIMENTAL DYNAMIC RESPONSE OF RAIL STRUCTURES ON URBAN RAILWAYS

Le Van Vu[1], Nguyen Huu Quyet[1], Tran Quang Minh[2], Nguyen Thi Cam Nhung[1*]

[1]University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

[2] University of Minho, Guimarães, Portugal

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 23/08/2023

Revised: 17/10/2023

Accepted: 08/12/2023

Published online: 15/12/2023

https://doi.org/10.47869/tcsj.74.9.5

Email: ncnhung@utc.edu.vn; Tel: +84947610939

Abstract. Urban railway is one of the advanced public transport methods, deployed in many large cities around the world with many advantages such as: fast travel time, large transport volume, environmental protection. , reduce traffic congestion... In Vietnam, several urban railway lines have been exploited/tested, opening a new stage of development for our country's public transport. However, these are also pilot projects so there are still many issues that need to be researched. According to classical standards and theories used in urban railway design in Vietnam, the dynamics of railway bridge structures often focus mainly on the bridge structure but ignore the dynamic behavior of the rails. For long-term development and ensuring operational safety requirements, improving life cycle quality, improving comfort when traveling by urban railways, evaluating the dynamic response of track structures under impact application of train load is necessary. In this study, the authors built a finite element model that considers the interaction between train - rail - bridge of the Cat Linh - Ha Dong urban railway bridge structure. The model mainly focuses on the behavior of the track, specifically the dynamic displacement under the action of the train with a simple bridge structure with a box cross-section in urban areas. The model is evaluated, compared, and updated with actual field measurement results. Through research, the finite element model will have uncertain parameters removed, be closer to reality, be capable of serving in-depth research, and contribute to ensuring safety in operations and maintenance project maintenance.

Keywords: Dynamic displacement, Dynamic model, Train-rail interaction, , Dynamic response experiment.

@2023 University of Transport and Communications

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải

XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC KẾT HỢP TÀU – RAY DỰA TRÊN THỰC NGHIỆM PHẢN ỨNG ĐỘNG CỦA KẾT CẤU RAY THUỘC TUYẾN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ

Lê Văn Vũ[1], Nguyễn Hữu Quyết[1], Trần Quang Minh[2], Nguyễn Thị Cẩm Nhung[1*]

[1]Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

[2]Trường Đại học Minho, Guimarães, Bồ Đào Nha

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 23/08/2023

Ngày nhận bài sửa: 17/10/2023

Ngày chấp nhận đăng: 08/12/2023

Ngày xuất bản Online: 15/12/2023

https://doi.org/10.47869/tcsj.74.9.5

* Tác giả liên hệ

Email: ncnhung@utc.edu.vn ; Tel: +84947610939

Tóm tắt. Đường sắt đô thị là một trong những phương thức vận tải công cộng tiên tiến, được triển khai tại nhiều thành phố lớn trên thế giới với nhiều ưu điểm như: thời gian di chuyển nhanh, khối lượng vận chuyển lớn, bảo vệ môi trường, giảm ùn tắc…Tại Việt Nam, một số tuyến đường sắt đô thị đã được khai thác/chạy thử mở ra một giai đoạn phát triển mới cho vận tải công cộng của nước ta. Tuy nhiên, đây cũng là các dự án thí điểm nên còn nhiều vấn đề cần được nghiên cứu. Theo các tiêu chuẩn và lý thuyết cổ điển được sử dụng trong thiết kế đường sắt đô thị tại Việt Nam, động lực học của kết cấu cầu đường sắt thường tập trung chính vào kết cấu cầu mà bỏ qua ứng xử động học của kết cấu đường ray hỗ trợ phương tiện. Để phát triển lâu dài và đảm bảo các yêu cầu về an toàn khai thác, nâng cao chất lượng vòng đời, cải thiện sự thoải mái khi di chuyển bằng đường sắt đô thị, đánh giá phản ứng động của kết cấu đường ray dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu là cần thiết. Trong nghiên cứu này, các tác giả xây dựng một mô hình phần tử hữu hạn có xét đến tương tác giữa tàu – ray – cầu của kết cấu cầu đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông. Mô hình chủ yếu tập trung vào ứng xử của đường ray, cụ thể là chuyển vị động dưới tác dụng của đoàn tàu với kết cấu cầu nhịp giản đơn có mặt cắt hộp trong đô thị. Mô hình được đánh giá và so sánh, cập nhật với kết quả đo đạc thực tế hiện trường. Thông qua nghiên cứu, mô hình phần tử hữu hạn sẽ được loại bỏ bớt các thông số không chắc chắn, tiến gần với thực tế hơn, có khả năng phục vụ các nghiên cứu sâu, góp phần đảm bảo an toàn trong vận hành bảo trì công trình.

Từ khóa: Chuyển vị động, Mô hình động lực học, Tương tác tàu – ray, , Thực nghiệm phản ứng động

@2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Xây dựng đường sắt đô thị là một trong những giải pháp tiên tiến và cấp thiết nhằm đảm bảo lưu thông tại các thành phố lớn, đặc biệt là thủ đô Hà Nội hiện nay. Việc đưa vào xây dựng và khai thác thử nghiệm một số tuyến đường sắt đô thị đã và đang nhận lại nhiều tín hiệu tích cực trong việc giải quyết ách tắc giao thông. Tuy nhiên, do là các dự án thí điểm, những công trình này vẫn còn tồn tại nhiều vấn đề cần nghiên cứu để đảm bảo an toàn trong quá trình khai thác và vận hành [1-3]. Một trong những vấn đề quan trọng nhất hiện nay là xem xét đảm bảo ứng xử động của cầu đường sắt dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu. Vấn đề tương tác động của tàu và cầu là một trong những chủ đề được quan tâm nghiên cứu trong nhiều năm trở lại đây. Một mặt, tàu chạy gây ra tác động động học lên các kết cấu cầu, ảnh hưởng đến trạng thái làm việc và tuổi thọ của chúng. Mặt khác, dao động của cầu lại ảnh hưởng đến độ ổn định và an toàn chạy tàu. Vì vậy, ở nhiều nước, ứng xử động lực học của cầu đã được nghiên cứu một cách có hệ thống trong quá trình phát triển đường sắt.

Tại Việt Nam, đã có nhiều nghiên cứu về động lực học kết cấu đường sắt, cầu đường sắt. Nguyễn Xuân Đại [4] đã phân tích ứng xử động lực học kết cấu đường sắt không ballast qua mô hình phần tử hữu hạn, kết quả cho thấy ảnh hưởng của vận tốc chạy tàu đến kết cấu đường sắt không ballast. Trương Trọng Vương và Lê Quang Hưng [5] đã nghiên cứu và trình bày ảnh hưởng của phổ đường ray không phẳng đến đặc tính động lực của đường sắt tốc độ cao. Một số nghiên cứu khác cũng trình bày những vấn đề liên quan đến động lực học của đường sắt [6], [7]. Tuy nhiên, các nghiên cứu liên quan đến phản ứng động của đường ray và tương tác giữa tàu và ray vẫn còn đang hạn chế.

Lý thuyết cổ điển về động lực học phương tiện đường sắt [8,9] thường tập trung vào bản thân phương tiện đường sắt làm đối tượng phân tích mà không xem xét ứng xử động lực học của hệ thống đường ray. Kết cấu ray được giả định là bộ phận của kết cấu nhịp cầu và thường không được xem xét đến tương tác động lực học giữa cầu và tàu. Trên thực tế, đường ray là một kết cấu đàn hồi, chuyển động của phương tiện có thể được truyền đến đường ray qua tiếp xúc giữa bánh tàu - đường ray và kích thích tạo ra rung động của kết cấu cầu. Và như vậy, hoàn toàn có thể xuất hiện ảnh hưởng ngược lại từ dao động của cầu đến sự rung động của phương tiện không chỉ theo phương thẳng đứng mà còn theo phương ngang. Với sự gia tăng vận tốc chạy tàu và tải trọng trục phương tiện, rõ ràng tác động của sự tương tác động giữa phương tiện và đường ray sẽ tăng lên. Hiệu ứng động lực học của phương tiện lên kết cấu đường ray cũng tăng theo. Hơn nữa, mối quan tâm lớn của các nhà thiết kế đường sắt hiện đại cũng như các kỹ sư bảo trì đều đang hướng tới là cải thiện sự thoải mái cho hành khách, ngăn chặn tình trạng rung lắc không mong muốn khi sử dụng phương tiện, giảm biến dạng của đường ray, giảm thiểu hư hỏng và mài mòn của cả phương tiện và các bộ phận của đường ray, và hơn hết là đảm bảo an toàn khi vận hành. Tất cả các khía cạnh trên liên quan đến hệ thống quan trắc, theo dõi phương tiện. Hiểu rõ các đặc tính động học của toàn bộ hệ thống mang lại khả năng tối ưu hóa các thông số thiết kế của cả phương tiện và các thành phần đường ray nhằm giảm thiểu tương tác động giữa đoàn tàu và đường ray. Do đó, cần phải nghiên cứu một cách chi tiết về hệ thống động lực học của đoàn tàu và đường ray từ –quá trình tương tác cầu-tàu. Đây là ý tưởng cơ bản của động lực học kết hợp tàu - ray, đã được tác giả áp dụng vào đầu những năm 1990 [10-12].

Sự phát triển nhanh chóng của kỹ thuật tính toán giúp dễ dàng phân tích một hệ thống tương tác tàu-ray phức tạp. Tuy nhiên, hầu hết các công trình nghiên cứu đều giải quyết các bài toán động lực học theo phương thẳng đứng. Đối với các vị trí tuyến nằm trong các đường cong bán kính nhỏ, các chuyển động ngang lớn của đường ray chắc chắn sẽ có ảnh hưởng lớn đến các lực động dọc và ngang giữa bánh xe và đường ray. Trong bài báo này giới thiệu một mô

hình phần tử hữu hạn ba chiều của hệ thống tàu-ray-cầu. dựa trên dữ liệu đo đạc tại hiện trường tuyến đường sắt Cát Linh – Hà Đông sẽ được xây dựng và bước đầu có những phân tích các đặc trưng động học này.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Mô hình lý thuyết

Trong thập kỷ qua, một loạt các mô hình hệ thống theo dõi phương tiện đã được thiết lập cho các mục đích nghiên cứu khác nhau. Mô hình khớp nối dọc và ngang cho hệ thống chuyển động của tàu có giá chuyển hướng và đường ray ba-lát là mô hình cơ bản nhất đã được giới thiệu đầu tiên vào năm 1996 [13]. Sun và các cộng sự năm 2003 [14] cũng đã trình bày một mô hình tương tự vào năm 2003. Bài báo trình bày một mô hình kết hợp 3 chiều cho toa xe và đường sắt bao gồm cả đường sắt không có lớp đá ba-lát. Mô tả kết cấu đường sắt tuyến khảo sát Cát Linh – Hà Đông được thể hiện trong Hình 1. Đây là kết cấu đường sắt không có đá ba-lát bao gồm đường ray, tấm lót đường ray, tà vẹt. Cả hai đường ray bên trái và bên phải được coi là các dầm Bernoulli–Euler liên tục được đỡ tại các điểm nối ray-tà vẹt bởi lớp lò xo và cản, thể hiện tính đàn hồi và cản do tấm đệm đường ray. Mô hình này cho phép nhập các tham số đường ray khác nhau dọc theo hướng dọc của đường ray. Ba loại dao động của đường ray được xem xét: thẳng đứng Z_r, ngang Y_r và xoắn Φ_r. Lò xo bên (K) và thông số cản C đại diện cho các đặc tính động bên trong hệ thống kẹp cố định ray.

Trong nghiên cứu này, đoàn tàu với đầu máy và toa xe được mô hình như sau: mỗi phương tiện được coi là một thực thể độc lập với 1 thân xe, 2 khung giá chuyển hướng và 4 trục xe. Cả hai hệ treo trên và dưới được mô hình như là 1 hệ đàn hồi bao gồm các lò xo cản . Tại mỗi đầu của trục bánh xe có các lò xo và cản theo phương ngang và phương đứng. Tổng cộng 8 lò xo và cản tạo thành hệ treo sơ cấp, còn 4 lò xo và cản bên trên tạo thành hệ treo thứ cấp. Mỗi một thân xe và khung giá chuyển hướng có 5 bậc tự do: chuyển vị theo phương đứng (Z) và ngang (Y), và góc xoay quanh trục x, y và z (Rx, Ry, Rz). Mỗi một trục bánh xe có 3 bậc tự do: chuyển vị theo phương đứng (Z) và phương ngang (Y), góc xoay quanh trục x (Rx). Theo đó, mô hình đoàn tàu có tổng cộng 27 bậc tự do.

2.2. Tương tác bánh xe - đường ray

Tương tác bánh xe đường ray được thể hiện qua lý thuyết đàn hồi phi tuyến Hertzian. Lực tương tác bánh xe và đường ray $p(t)$ được xác định bởi.

$$p(t) = \left[\frac{1}{G}\delta Z(t)\right]^{3/2} \tag{1}$$

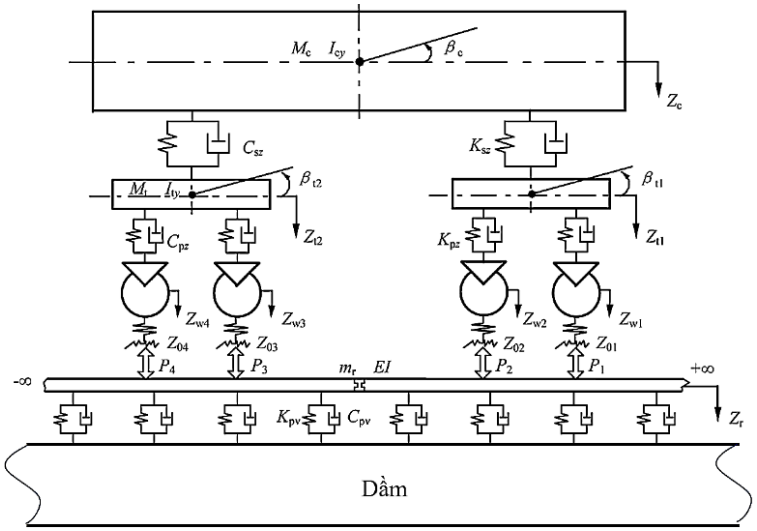
Trong đó G là hằng số tiếp xúc giữa bánh xe và đường ray, $\delta Z(t)$ là biến dạng nén đàn hồi được tính bằng:

$$\delta Z(t) = \delta Z_0 + \delta Z_{wt}(t) - \eta(t) \tag{2}$$

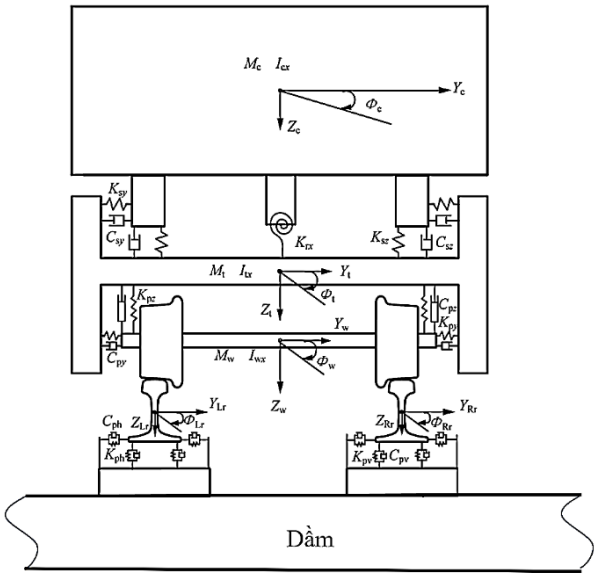
δZ_0 biến dạng tĩnh so với tải trọng tĩnh của bánh xe là P_0, $\delta Z_{wt}(t)$ chuyển vị tương đối giữa bánh xe (Z_w) và ray (Z_p).

$$\delta Z_0 = G p_0^{2/3} \tag{3}$$

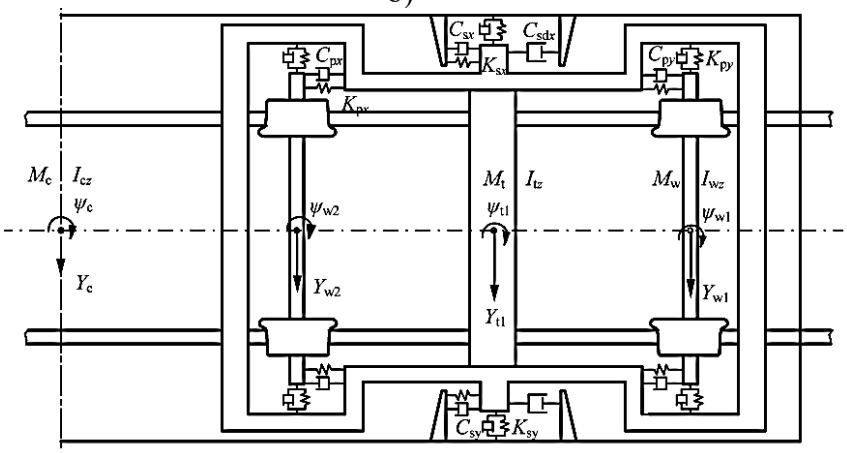
$$\delta Z_{wt}(t) = Z_w(t) - Z_r(x,t) \tag{4}$$



a)



b)



c)

Hình 1. Mô hình kết hợp tàu – cầu – ray ba chiều: a) Hình chiếu đứng; b) Hình chiếu cạnh; c) Hình chiếu bằng.

Trong phương trình (2), $\eta(t)$ biểu thị sự bất thường về hình học trên bề mặt của đường ray và bánh xe như bánh xe không tròn, đường ray lượn sóng hay là hàm biến dạng đường ray, $\eta(t)$ có thể là bất kỳ loại hàm xác định nào. Sự thay đổi vận tốc cũng kích thích đến sự tương tác giữa bánh xe và đường ray. Đặc biệt các kích thích này thường xảy ra ở các mối nối ray, sẽ dẫn đến hiện tượng bánh xe/đường ray bị xóc và rung.

Các phương trình của hệ thống phụ của phương tiện có thể dễ dàng thu được theo nguyên lý của D'Alembert và các phương trình này đã được đưa ra trong [5]. Các dạng phương trình hệ thống đường ray phức tạp hơn trước đây do tính liên tục của đường sắt. Phương trình vi phân đường sắt là một phần như sau:

$$\frac{\partial^4 Z_r(x,t)}{\partial x^4} + m_r \frac{\partial^2 Z_r(x,t)}{\partial t^2} = \sum_{j=1}^{4} G_j(t)\delta\left(x - x_{Gj}\right) - \sum_{i=1}^{N} F_{rsi}(t)\delta(x - x_i) \tag{5}$$

Trong đó N là số điểm đỡ đường ray, $\delta(x)$ là hàm Dirac delta, $G_j(t)$ và $F_{rsi}(t)$ là lực động giữa bánh xe và đường ray và giữa đường ray và tà vẹt.

$$G_j(t) = p_j(t) - p_0 \tag{6}$$

$$F_{rsi}(t) = K_{pi}\left[Z_{,}(x_i,t) - Z_{si}(t)\right] + C_{pi}[Z_r(x_i,t) - Z_{ti}(t)] \tag{7}$$

Để biến đổi các phương trình vi phân từng phần của đường ray thành phương trình:

$$Y_k(x) = \sqrt{\frac{2}{m_r l}} \sin\frac{k\pi x}{l} \tag{8}$$

Trong đó l là chiều dài hiệu quả của đường ray. Nghiệm của phương trình (7) được xác định là:

$$Z_r(x,t) = \sum_{k=1}^{NM} Y_k(x) q_k(t) \tag{9}$$

Trong đó $q_k(t)$ là tọa độ chế độ thứ k và NM là số chế độ. Thực nghiệm số cho thấy các chế độ đường sắt sẽ hội tụ tốt nếu NM > 60. Bằng cách áp dụng phương pháp của Ritz để trình bày các vấn đề, chúng ta có thể nhận được dạng cơ bản của phương trình vi phân phụ thuộc thời gian của đường ray cho hình thái dao động thứ k.

$$\ddot{q}_k(t) + \frac{EI}{m_r}\left(\frac{k\pi}{l}\right)^4 q_k(t) = \sum_{i=1}^{4} G_i(t) Y_k(x_{Gi}) - \sum_{i=1}^{N} F_{nt}(t) Y_k(x_i) \tag{10}$$

Với k = 1~NM. Việc thiết lập các phương trình động học của tà vẹt [5] sẽ dễ dàng hơn. Do đó, các phương trình của hệ thống khớp nối tàu ray trở thành một tập hợp lớn các phương trình:

$$[M]\{A\} + [C]\{V\} + [K]\{X\} = \{F\} \tag{11}$$

Trong đó [M], [C], [K] lần lượt là ma trận khối lượng, cản và độ cứng. {F} là vectơ của các lực phương thức và của các lực bên ngoài. Và {X}, {V}, {A} lần lượt là các vectơ chuyển vị tổng quát, vận tốc và gia tốc. Để giải quyết một bài toán phức tạp với số lượng DOF lớn như vậy thì đòi hỏi một khối lượng tính toán lớn. Tuy nhiên với sự phát triển của khoa học công nghệ, các công cụ mạnh mẽ thì việc tính toán kết cấu theo phương pháp phần tử hữu hạn ngày càng trở nên dễ dàng đặc biệt từ khi xuất hiện các phần mền tính toán kết cấu hiện đại.

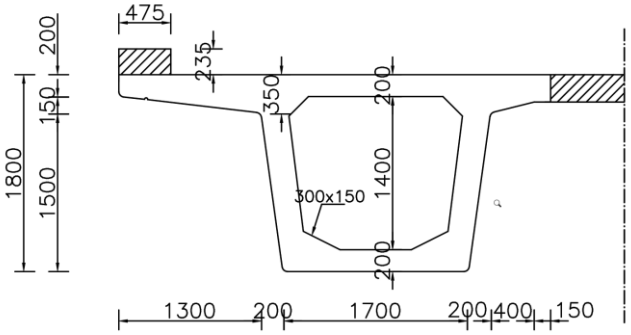
Như vậy có thể thấy rằng chuyển vị ray phụ thuộc lực tương tác động của tàu – ray – cầu hay chính là tải trọng trục và vận tốc tàu chạy. Bên cạnh đó điều kiện ràng buộc giữa ray và dầm phụ thuộc vào hệ thống phụ kiện giữ ray cũng gây ảnh hưởng không nhỏ.

3. MÔ HÌNH TÍNH TOÁN VÀ THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH ẢNH HƯỞNG CỦA VẬN TỐC ĐẾN DAO ĐỘNG KẾT CẤU ĐƯỜNG RAY

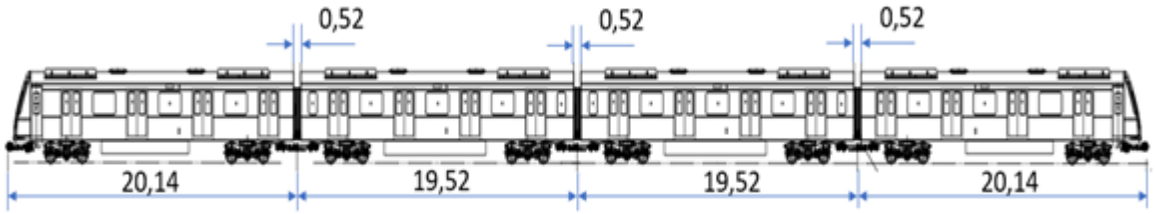
3.1. Mô tả kết cấu tàu - cầu

Cát Linh - Hà Đông là tuyến đường sắt đô thị thuộc mạng lưới Đường sắt đô thị Hà Nội (2). Chiều dài toàn tuyến là 13021,48m, tổng cộng có 12 ga, lần lượt là: ga Cát Linh, ga Đê La Thành, ga Thái Hà, ga đường Láng, ga Đại học Quốc gia, ga Vành Đai 3 ga Thanh Xuân , ga bến xe Hà Đông, ga Hà Đông (Bệnh viện Hà Đông), ga La Khê, ga Văn Khê, ga Bến xe Hà Đông mới, khoảng cách trung bình giữa các ga khoảng 1151 m toàn tuyến được thiết kế trên cao. Kết cấu nhịp chính của tuyến là các nhịp đơn giản có mặt cắt ngang điển hình là tiết diện hộp. Các nhịp giản đơn có nhiều dài nhịp dao động từ 18,5m đến 32m.

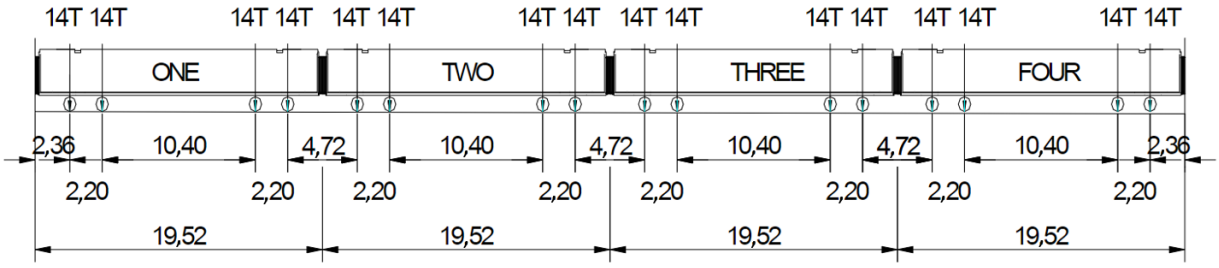
Hình 2. Tuyến Cát Linh – Hà Đông.



Hình 3. Mặt cắt ngang kết cấu cầu.



Hình 4. Đoàn tàu khai thác trên tuyến Cát Linh – Hà Đông (Đơn vị: m).



Hình 5. Tải trọng thiết kế đoàn tàu (Đơn vị: Tấn, m).

Một số thông số cơ bản về đoàn tàu sử dụng trên tuyến đường sắt Cát Linh - Hà Đông: mỗi đoàn tàu gồm 4 toa, mỗi toa dài 19,52m, khoảng cách trục cố định là 2,2m, khoảng cách cố định giữa các toa là 12,6m, trục tàu nặng là 140kN, trọng lượng thông số của đoàn tàu đang được khai thác được thể hiện trong Hình 4 và Hình 5.

3.2. Mô hình phần tử hữu hạn tính toán chuyển vị của ray

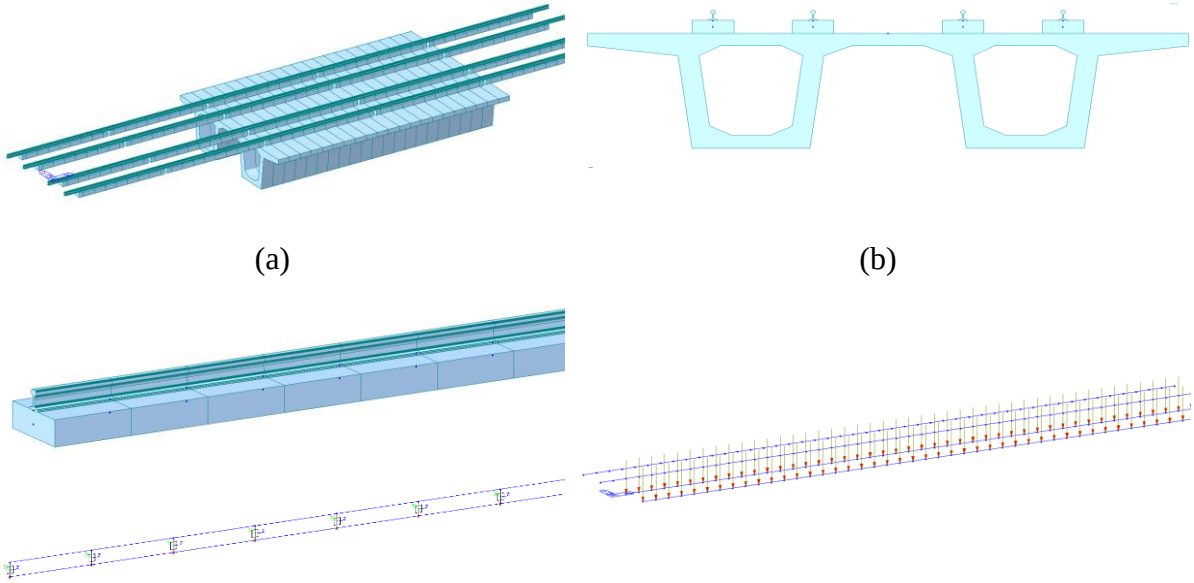
Các thông số đầu vào được lấy dựa trên hồ sơ thiết kế của dự án đường sắt Cát Linh – Hà Đông [15]. Các thông số về vật liệu được sử dụng trong mô hình tính toán được trình bày trong bảng dưới đây:

Bảng 1: Một số thông số của mô hình.

Phần tử	Thông số	Đơn vị	Giá trị
Ray	Diện tích	cm^2	77,45
	Momen quán tính với trục nằm ngang	cm^2	3217
	Mô men quán tính với trục thẳng đứng	cm^2	524
	Modun đàn hồi	MPa	$2,1\times10^5$
Phụ kiện giữ ray	Lực buộc dọc/từng nhóm	kN	9
	Độ cứng dọc/từng nhóm	kN/mm	35
	Độ cứng ngang/từng nhóm	kN/mm	50
Tà vẹt	Mác bê tông	-	C50
	Trọng lượng tiêng	kg/m^3	2500
	Modun đàn hồi	MPa	$3,45\times10^4$
Dầm	Chiều dài	m	30
	Mác bê tông	-	C50
	Trọng lượng tiêng	kg/m^3	2500
	Modun đàn hồi	MPa	$3,45\times10^4$

Mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng bằng phần mềm Midas và được chia làm 3 bộ phận chính:

- Kết cấu nhịp cầu: nhịp giản đơn dầm hộp có chiều dài L = 30m, có kích thước mặt cắt mô tả như hình 3
- Kết cấu tà vẹt bê tông cốt thép được liên kết trực tiếp với dầm.
- Kết cấu ray: loại ray sử dụng P50 (50kg/m), liên kết giữa ray và tà vẹt là liên kết đàn hồi, độ cứng kết phụ thuộc vào phụ kiện giữ ray.
- Trong mô hình ray, dầm, tà vẹt được mô tả trong Hình 6 là các phần tử dầm (beam). Phần tử tà vẹt được liên kết cứng (Rigid link) với phần tử dầm, phần tử ray liên kết với tà vẹt thông qua các các gối đàn hồi (Elastic link) có độ cứng là độ cứng quy định bởi phụ kiện giữ ray. Khoảng cách giữa các phụ kiện giữ ray là 630mm. Cho nên dầm, ray và tà vẹt sẽ được chia thành các phần tử có chiều dài là 630mm là khoảng cách phù hợp để bố trí liên kết giữa phụ kiện giữ ray và tà vẹt.



(a) (b)

(c) (d)

Hình 6. Mô hình tính chuyển vị trên phần mềm (a) Mô hình 3D kết cấu nhịp dầm; (b) Mặt cắt ngang mô hình tại vị trí giữa nhịp; (c) Liên kết giữa ray và tà vẹt; (d) Gắn tải trọng đoàn tàu di chuyển vào mô hình.

3.3. Bố trí thử nghiệm hiện trường

3.3.1. Thiết bị sử dụng

Chuẩn bị các thiết bị cần sử dụng để đo đạc, thử nghiệm, kiểm tra hiệu chuẩn (Hình 7) bao gồm:

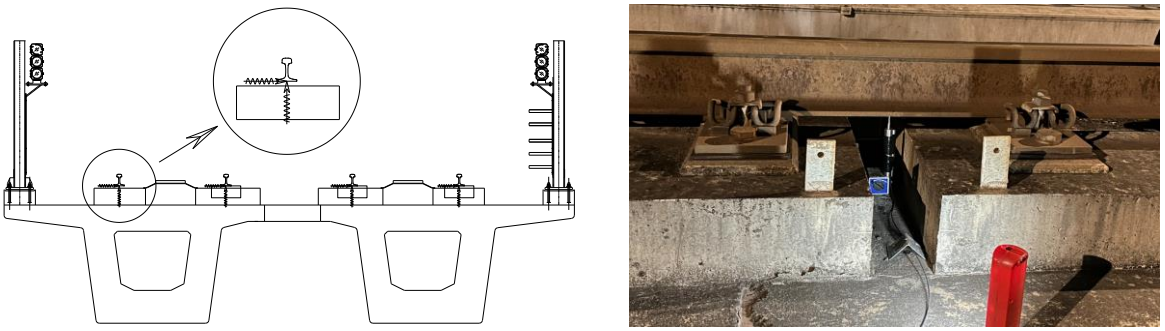
- Cảm biến đo chuyển vị động: Sử dụng 2 cảm biến LVDT S Series có dải đo từ 0-50mm.
- Mô đun thu dữ liệu và cấp nguồn cho cảm biến
- Bộ giá đỡ đầu đo chuyển vị với đường ray
- Máy tính chuyên dụng để thu dữ liệu.

(a) (b) (c)

Hình 7. Hệ thống thiết bị sử dụng thí nghiệm; (a) Đầu xử lý Solartron Metrology; (b) Cáp truyền tín hiệu; (c) Đầu đo chuyển vị LDVT.

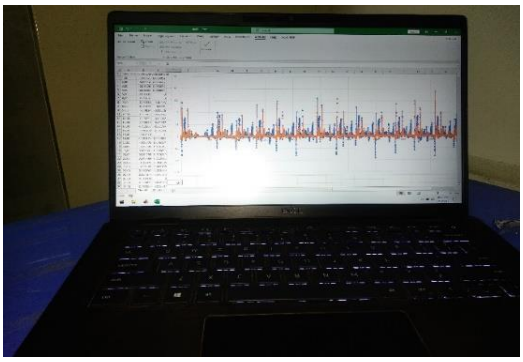
3.3.2. Thử nghiệm, thu thập dữ liệu tại hiện trường

Các vị trí đo đạc được xác định thực tế tại hiện trường tương ứng với vị trí giữa nhịp.



Hình 8. Lắp đặt cảm biến thu thập dữ liệu.

Tại vị trí thử nghiệm, lắp đặt các đầu đo LDVT theo phương thẳng đứng và nằm ngang trên hệ thống ray – Hình 8. Thiết bị đo được bố trí tại 2 đường ray phải tuyến theo hướng ga Cát Linh đi ga La Thành. Các phép đo với tàu chạy ở tốc độ theo quy định công lệnh chạy tàu. Dữ liệu được ghi lại liên tục trong mỗi lần đo: trước khi tàu đến, trong khi tàu đi qua vị trí đo và sau khi tàu đi qua (Hình 9, Hình 10). Tốc độ chạy tàu được lấy từ hồ sơ chạy tàu của phòng quản lý đường sắt đô thị tại Ga Cát Linh. Theo đó, tốc độ tàu chạy qua vị trí thí nghiệm là 55,6 km/h. Tốc độ này ổn định và chênh lệch không nhiều giữa các lần đo do quy định trong quá trình vận hành tuyến.



Hình 9. Thu thập và lưu trữ dữ liệu.

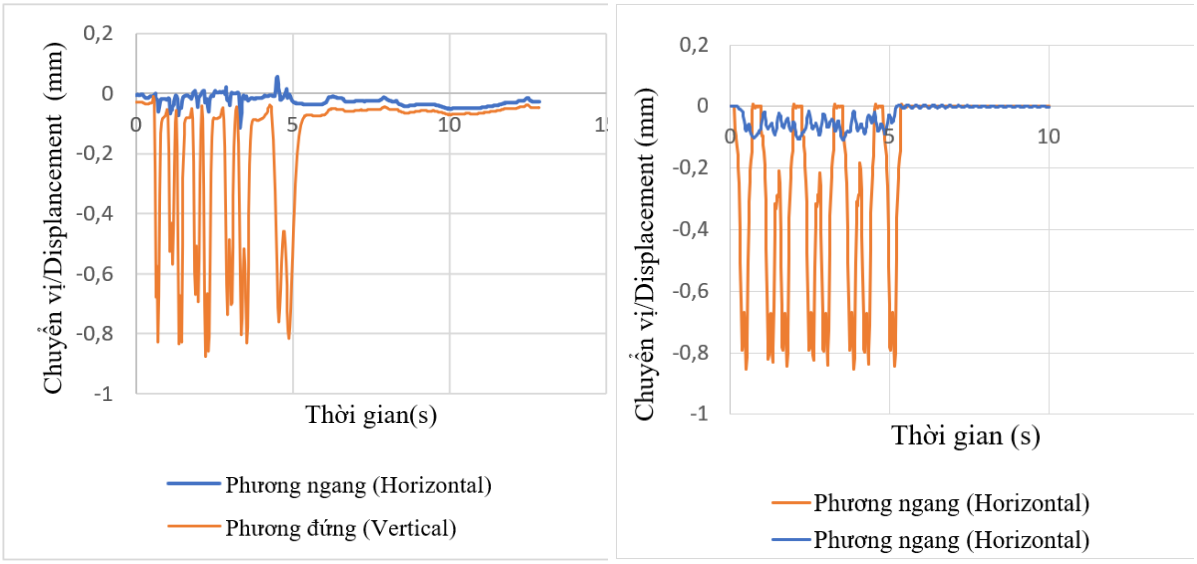
Hình 10. Đoàn tàu di chuyển qua vị trí đo đạc.

3.4. Tính toán phân tích và xử lý kết quả

Từ thí nghiệm hiện trường, các dữ liệu đo chuyển vị ray được lưu trữ trong máy tính xách tay chuyên dụng phục vụ công tác xử lý. Trong quá trình đo, một số tác động bên ngoài có thể ảnh hưởng đến kết quả. Tuy nhiên, dữ liệu sẽ được thu thập trong một thời gian dài để ổn định và loại bỏ được các dữ liệu nhiễu. Sau đó, tiến hành phân tích khoảng thời gian được đánh dấu có tàu thí nghiệm chạy qua để tiếp tục xử lý. Bằng cách sử dụng phần mềm chuyên dụng theo mô đun LVDT, các tín hiệu điện được chuyển trực tiếp sang tín hiệu chuyển vị. Các giá trị chuyển vị của ray theo phương thẳng đứng và phương nằm ngang theo thí nghiệm được thể hiện trong Hình 11a. Theo đó, thời gian tàu đi qua vị trí đo khoảng 5s, các đỉnh chuyển vị theo hai phương được cảm biến ghi lại liên tục. Giá trị chuyển vị lớn nhất ghi được theo phương đứng là 0,839mm, theo phương ngang là 0,121mm. Tuy nhiên, thông qua biểu đồ có thể thấy do nhiễu tín hiệu và tần số lấy mẫu chưa thực sự liên tục nên giữa các đỉnh chuyển vị có khoảng cách không đều.

Dựa trên thời gian di chuyển qua vị trí cảm biến, tiến hành thiết lập thời gian mô hình tàu chạy trong mô hình phần tử hữu hạn tương tự với thời gian này. Giá trị chuyển vị của ray trong

mô hình được thể hiện trong Hình 11b. Giá trị chuyển vị lớn nhất ghi được theo phương đứng là 0,854mm, theo phương ngang là 0,129mm. Các đỉnh chuyển vị chạy trong mô hình do không chịu ảnh hưởng của nhiễu tín hiệu và các tác nhân khác nên có khoảng cách đều nhau. Kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm có sự tương đồng.



(a) (b)

Hình 11. Chuyển vị theo phương thẳng đứng và phương ngang lớn nhất đo được; (a) Chuyển vị đo thực nghiệm, (b) Chuyển vị tính toán.

Chuyển vị lớn nhất đạt được khi các trục tàu đi qua vị trí điểm đo sau đó giảm. Trên biểu đồ chuyển vị đứng xuất hiện 16 đỉnh tương ứng với thời điểm của 16 trục tàu lần lượt đi qua vị trí điểm đo. Tổng hợp kết quả đo chuyển trực tiếp trên kết cấu đường ray ngoài hiện trường và kết quả chyển vị tính toán trên mô hình, đánh giá chuyển vị theo phương ngang của ray theo các đặc trưng về hệ số lật bánh và tỉ lệ giảm tải trọng bánh xe quy định trong TCVN về Phương tiện đường sắt đô thị khổ 1435mm – Yêu cầu kỹ thuật, phương pháp thử [16]. Kết quả được thể hiện trong bảng dưới đây.

Bảng 2. So sánh độ an toàn vận hành kết quả đo đạc thực tế so với kết quả tính toán mô hình.

Chỉ tiêu	Kết quả đo đạc	Kết quả tính toán	Sai số
Chuyển vị đứng (mm)	0,839	0,854	1,5%
Chuyển vị ngang (mm)	0,121	0,129	0,8%

4. KẾT LUẬN

Hiện nay, hệ thống giao thông bằng đường sắt đã và đang trở thành một hình thức di chuyển có nhiều lợi ích về kinh tế và dần trở nên phổ biến hơn, đặc biệt là trong các khu vực đô thị. Một trong số các vấn đề ảnh hưởng trực tiếp đến đảm bảo an toàn và hiệu quả khi khác thác, vận hành là việc đánh giá các phản ứng động của kết cấu đường ray dưới tải trọng đoàn tàu.

Đây là một bài toán phức tạp khi khó có thể xác định được mô hình tương ứng và phù hợp để phân tích sự tương tác này với các dạng kết cấu cầu khác nhau.

Nghiên cứu trình bày về việc xây dựng mô hình động lực học kết hợp tàu – ray dựa trên thực nghiệm phản ứng động của kết cấu ray thuộc tuyến đường sắt đô thị. Đối tượng áp dụng là tuyến đường sắt đô thị Hà Nội – tuyến Cát Linh-Hà Đông. Mô hình động lực học được xây dựng dựa trên tương tác và mối quan hệ giữa ray – tàu – cầu. Sau khi mô phỏng các thông số giống với hồ sơ thiết kế, các liên kết giữa ray và kết cấu cầu được bổ sung vào mô hình. Thời gian tàu chạy qua vị trí đang xét trên kết cấu được mô phỏng tương tự với thực tế. Thông qua kết quả của biểu đồ chuyển vị động thực đo và mô phỏng, mô hình được xác nhận gần giống với thực tế khai thác. Sai số giữa kết quả đo thực tế và thực nghiệm là tương đối thấp với 1,5% cho chuyển vị ngang và 0,8% cho chuyển vị đứng, từ đó chứng minh sự phù hợp của mô hình tính toán trong bài toán đo đạc thực tế. Thông qua mô hình được xây dựng trong nghiên cứu này, có thể phát triển thêm các kết quả với các mức tải trọng và vận tốc khai thác khác để tối ưu hóa quá trình vận hành khai thác của tuyến đường sắt đô thị nội đô, đồng thời phục vụ các nghiên cứu sâu trong tính toán đánh giá đường sắt đô thị.

Kết quả của nghiên cứu này có thể là một tài liệu tham khảo hữu ích cho các bài toán phân tích thực nghiệm và mô hình số về tương tác cầu-tàu, đặc biệt khi sự phát triển mạng lưới đường sắt đô thị đang dần được quan tâm tại Việt Nam nói chung và Thành phố Hà Nội nói riêng. Thông qua các nghiên cứu về phân tích sự tương tác trên, có thể đưa ra các kết luận và kiến nghị về tải trọng và vận tốc khai thác để đảm bảo an toàn cho đối tượng sử dụng và tối đa khả năng vận hành của các tuyến đường sắt này.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Tập đoàn Vingroup và hỗ trợ bởi Quỹ đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF) trong Dự án mã số VINIF.2021.DA00192.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Minh Quang Tran, Hélder S.Sousa, Nhung Thi Cam Nguyen, Quyet Huu Nguyen, Jose Campos e Matos, Opportunities and Challenges of Digital Twins in Structural Health Monitoring, in Proceedings of the 4th International Conference on Sustainability in Civil Engineering, 344 (2022) 673-681. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2345-8_69

[2]. Nhung Thi Cam Nguyen, Minh Quang Tran, Hélder S. Sousa, Thuc Van Ngo, José C. Matos, Damage detection of structural based on indirect vibration measurement results combined with Artificial Neural Network, Journal of Materials and Engineering Structures, 9 (2022) 403-410. https://revue.ummto.dz/index.php/JMES/article/view/3286

[3]. M.Q. Tran et al., Structural Assessment Based on Vibration Measurement Test Combined with an Artificial Neural Network for the Steel Truss Bridge, Appl Sci, vol. 13 , no. Infrastructure Management and Maintenance: Methods and Applications, 13 (2023) 7484. https://doi.org/10.3390/app13137484

[4]. Nguyễn Xuân Đại, Phân tích ứng xử động lực học kết cấu đường sắt không ballast qua mô hình 1 và 2 bậc tự do, Tạp Chí KHCN Xây Dựng, 2 (2014) 10-18. https://ibst.vn/DATA/nhyen/NguyenXuanDai-2-2014.pdf

[5]. Trương Trọng Vương, Lê Quang Hưng, Phân tích ảnh hưởng của phổ đường ray không phẳng thuận đến đặc tính động lực của đường sắt tốc độ cao, Tạp Chí Giao Thông Vận Tải, 10 (2021) 71-75.

[6]. Phạm Duy Hòa, Trần Việt Hùng, Phùng Bá Thắng, Nguyễn Thị Nguyệt Hằng, Nghiên cứu phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc,Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng, 15 (2021)

1 - 12. https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7V)-01

[7]. N.T.C. Nhung, T.Q. Minh, The effects of ground vibration induced by construction activities of urban railways in Hanoi, Journal of Materials and Engineering Structures, 7 (2021) 703-710. https://revue.ummto.dz//index.php/JMES/article/view/2591

[8]. A. Wickens, Fundamentals of rail vehicle dynamics. CRC Press, 2003.

[9]. Vijay Garg, Dynamics of Railway Vehicle Systems, 1984.

[10]. W. Zhai, The vertical coupling dynamics of vehicle and track as an integral system, Diss. Dr. Degree, 1991.

[11]. W. Zhai, W. Kaiwen, F. Maohai, Y. Junmao, Minimizing dynamic interaction between track and heavy haul freight cars, 1993.

[12]. W. Zhai , X. Sun, A detailed model for investigating vertical interaction between railway vehicle and track, Vehicle System Dynamics, 23 (1994) 603–615. https://doi.org/10.1080/00423119308969544

[13]. Y. Q. Sun, M. Dhanasekar, A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system, International Journal of Solids and Structures, 39 (2002) 1337–1359. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00224-4

[14]. Y. Sun, M. Dhanasekar, D. Roach, A three-dimensional model for the lateral and vertical dynamics of wagon-track systems, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, 217 (2003) 31–45. https://doi.org/10.1243/095440903762727339

[15]. Ban quản lý dự án đường sắt (RPMU), Hồ sơ thiết kế kỹ thuật dự án đường sắt Cát Linh - Hà Đông.

[16]. Tiêu chuẩn quốc gia, TCVN 9273:2012 về Phương tiện đường sắt đô thị khổ đường 1435 mm – Yêu cầu kỹ thuật, phương pháp thử.